

**Познакомьтесь с методами измерений малой мощности,
малого напряжения и малого сопротивления**
*для измерения характеристик графена, углеродных
нанотрубок и других наноматериалов и наноустройств*

**Роберт Грин (Robert Green)
Keithley Instruments, Inc.**

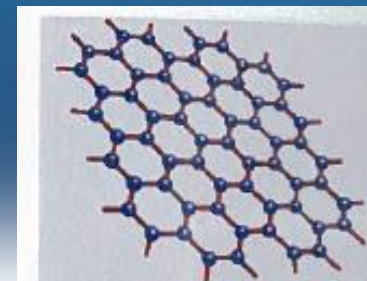
KEITHLEY

ПОЛНАЯ УВЕРЕННОСТЬ

Содержание

- Свойства и применение графена
- Измерение характеристик материалов
- Приборы и методы для получения правильных результатов
- Измерение характеристик устройств
- Сложности на пути получения правильных результатов
- Заключение

Свойства графена



- Высококачественная, безупречная кристаллическая решетка – без атомарных дефектов
- Прочные, но очень гибкие связи
 - Прочнее алмаза
 - Гибкость и способность выдерживать значительные деформации
- Очень высокая электро- и теплопроводность
 - Электроны свободно проходят сквозь графен и ведут себя в соответствии с квантовыми электродинамическими законами
 - Подвижность носителей $\sim 10000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при комнатной температуре и до $200000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ во взвешенном состоянии
- Прозрачность
- Сродство с другими элементами

Широкий диапазон возможных применений графена

Полупроводниковые
транзисторы

Фотоэлектрические
устройства

Прозрачные
проводники

Датчики

Высокочастотные
устройства

Эффективные
солнечные
элементы

Гибкие дисплеи

NO_2

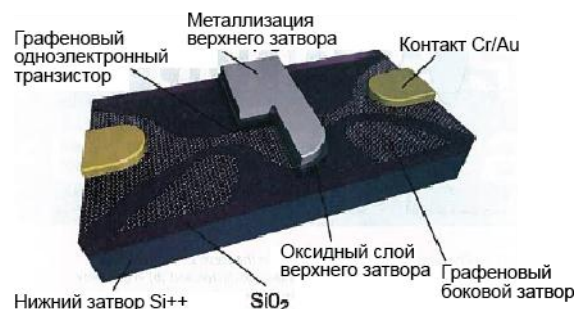
Одноэлектронные
транзисторы

Сенсорные экраны

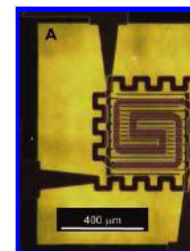
NH_3

Печатная электроника

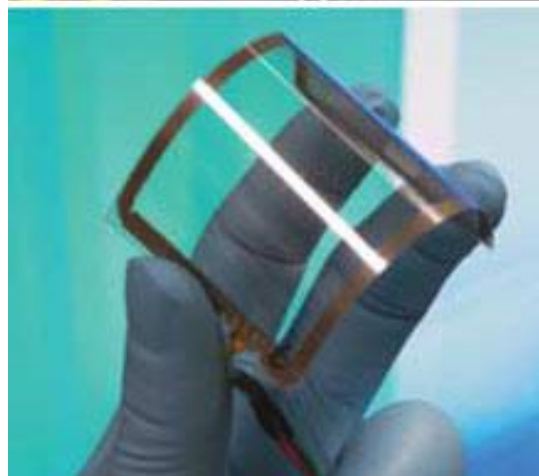
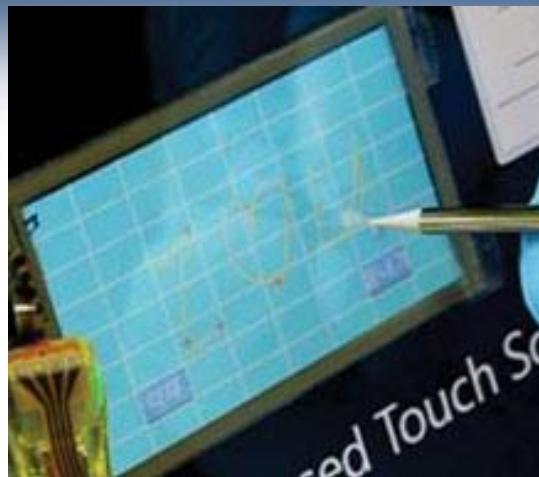
Динитротолуол



Полимерные
КОМПОЗИТЫ

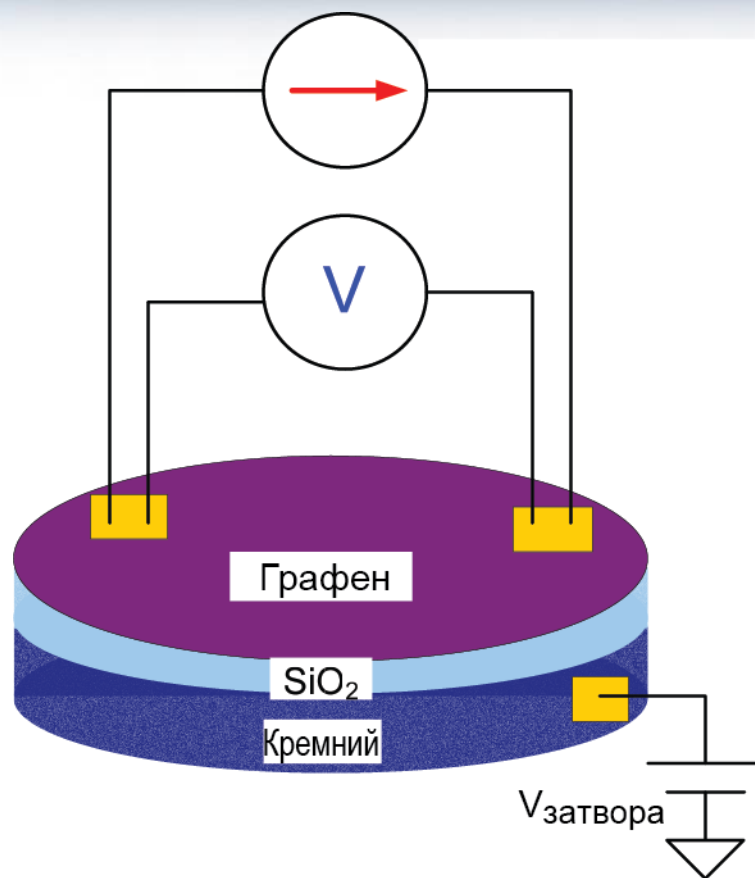


Гибкий сенсорный экран Samsung



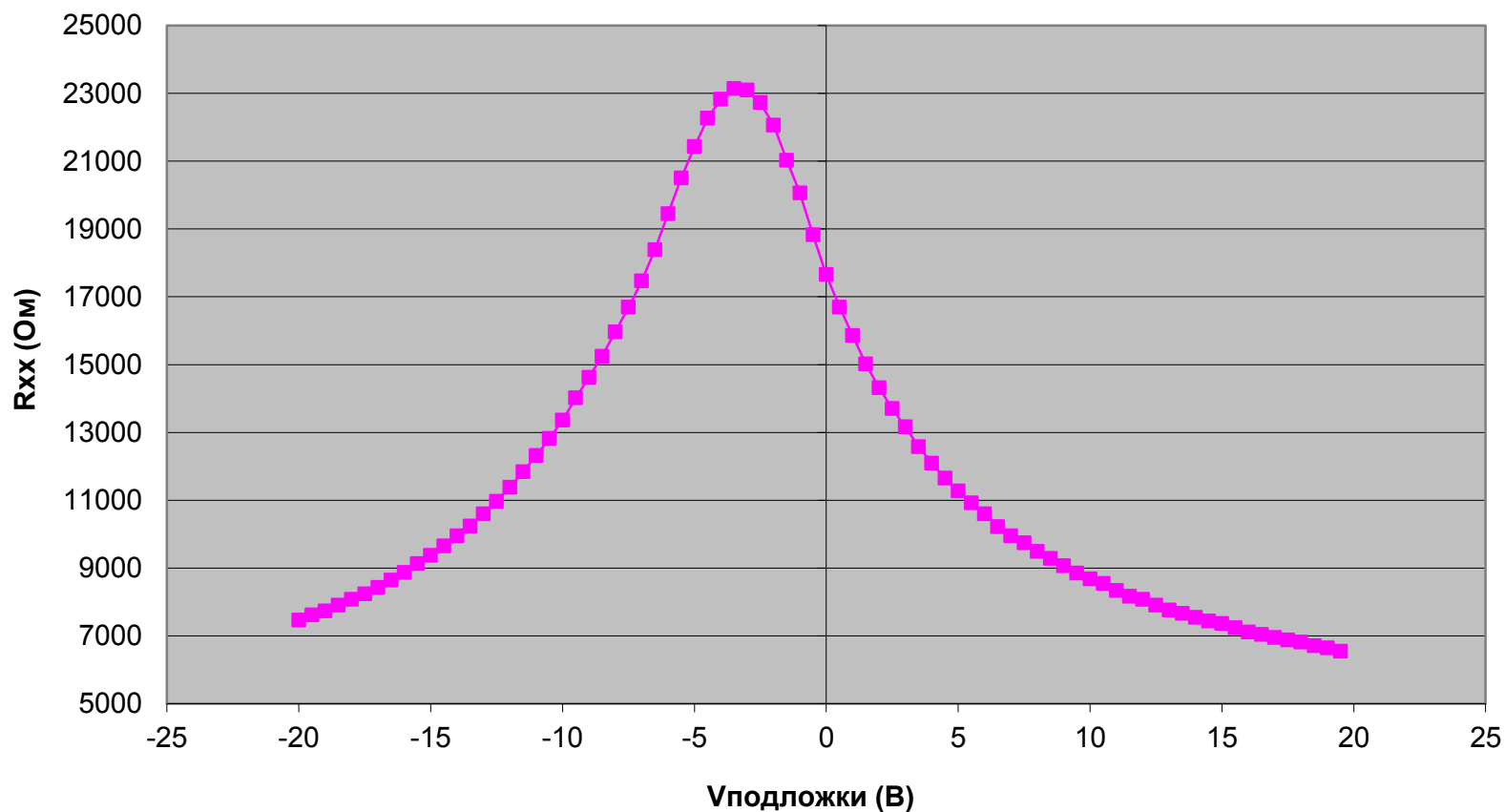
Источник: <http://www.technologyreview.com/computing/25633/?a=f>

Измерение зависимости сопротивления от напряжения на затворе с применением методов измерения характеристик материалов

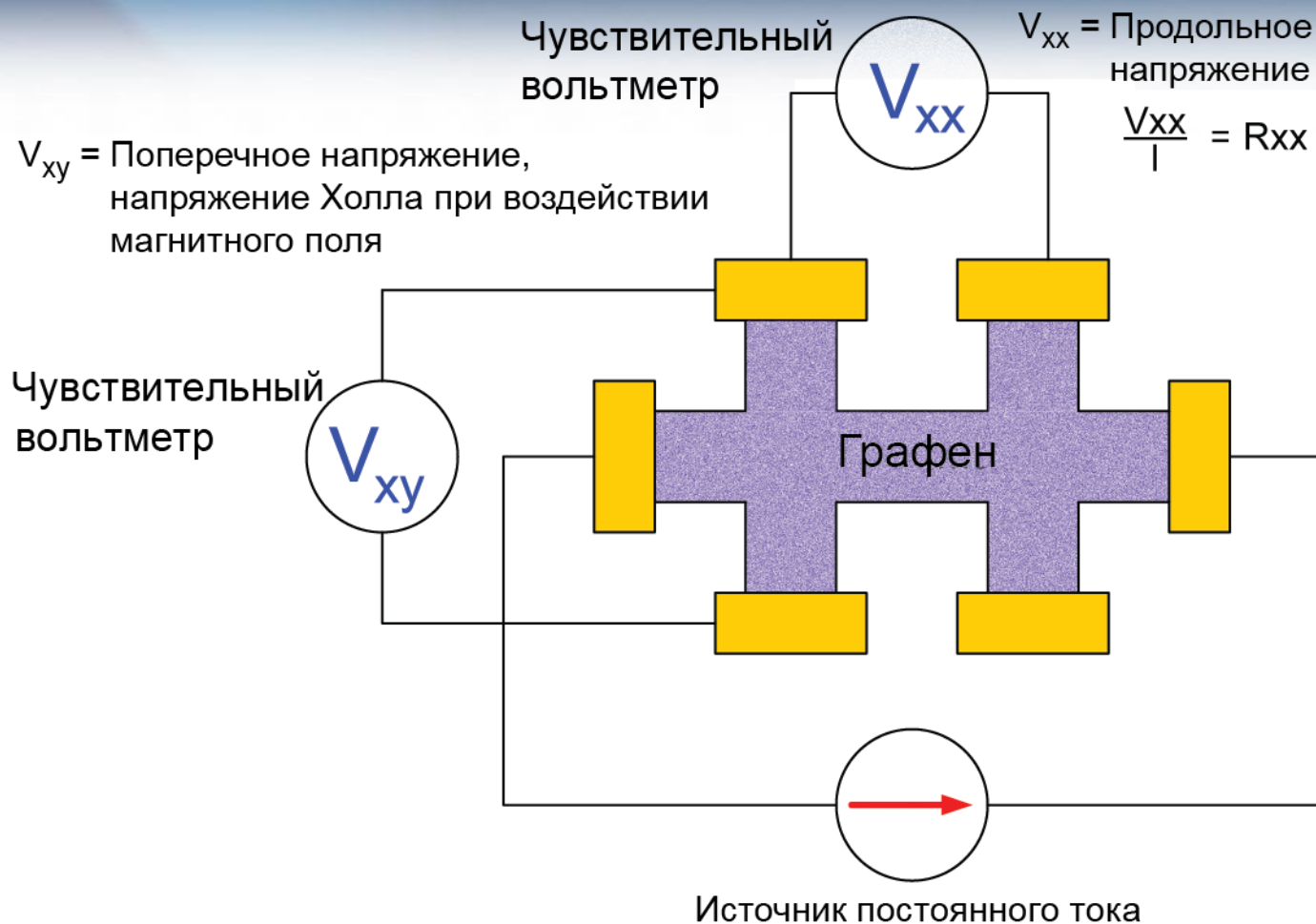


Результаты измерения графенового образца

Зависимость продольного сопротивления графенового слоя на кремниевой подложке от напряжения на подложке



Метод измерения напряжения Холла и сопротивления



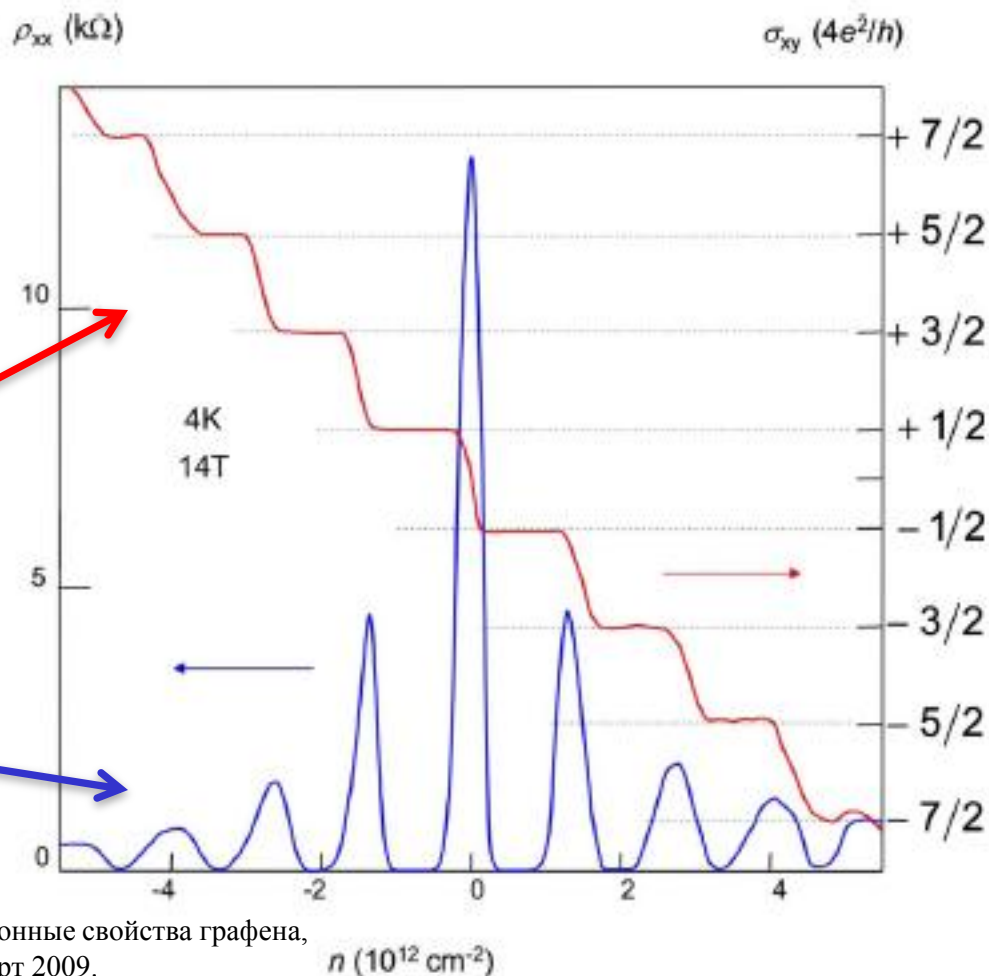
Пример измерения квантового эффекта Холла на графеновом образце

Напряжение
Холла

V_{xy}

Продольное
напряжение

V_{xx}



Источник: Кастро Нето с соавторами, Электронные свойства графена, журнал Reviews of Modern Physics, январь-март 2009.

Рекомендуемые инструментальные опции

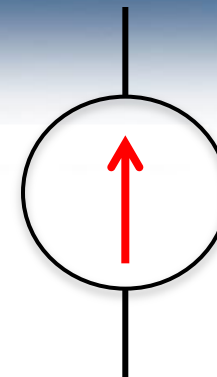
Требования к источнику тока

Должен подавать очень малые токи ($\ll 10^{-6} \text{ A}$) с высокой точностью для ограничения мощности, рассеиваемой образцом

Должен обладать высоким коэффициентом стабилизации, гарантируя точное значение тока в материале

Должен допускать точную регулировку напряжения, во избежание перенапряжения и повреждения устройства

Должен быть биполярным, чтобы исключить смещение напряжения и снизить шум



Источник тока, модель 6220/6221



Выходной ток: 100 фА – 100 мА

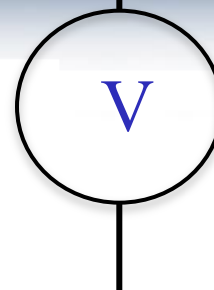
Выходное сопротивление: 10^{14} Ом

Точность установки: 0,1 В

Режимы работы: биполярный источник пост. тока, источник перем. тока (6221)

Рекомендуемые инструментальные опции

Требования к нановольтметру



Должен точно измерять значения
напряжения $< \mu\text{V}$

Должен обладать малым шумом

Высокое подавление шума переменного
тока

Нановольтметр, модель 2182A



Разрешение: 1 нВ в диапазоне 10 мВ

Шум: 25 нВ_{пик-пик} при отклике 1 с

15 нВ_{пик-пик} при отклике 25 с

Коэфф. подавления синфазных помех: 110 дБ

Рекомендуемые инструментальные опции

Требования к источнику питания/измерителю

Интегрированный прецизионный источник и измеритель по 4-проводной схеме

Разрешение источника и чувствительность измерителя не хуже единиц мкА и мВ

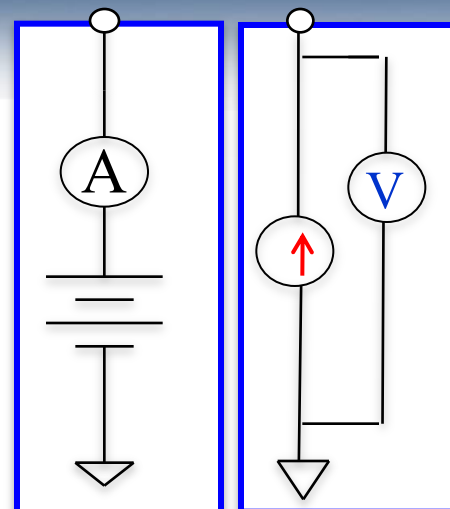
Функция свипирования

Работа в четырех квадрантах

Встроенная компенсация смещения

Измеритель I

Источник V



Измеритель V
Источник I

Модель 2400 SourceMeter®



Разрешение источника: 50 пА, 5 мкВ

Чувствительность измерителя: 10 пА, 1 мкВ

Одно- и двухканальные модели

Рекомендуемые инструментальные опции

Система для измерения параметров полупроводников

Готовый программно-аппаратный комплекс со встроенными процедурами измерения:

- Сопротивления
- Эффекта Холла
- Пост. напряжений и импульсных ВАХ
- ВФХ

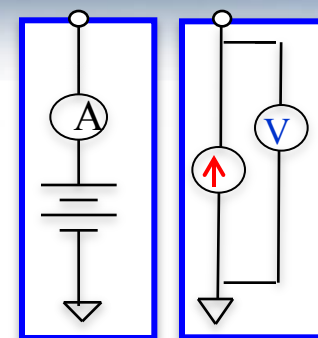
Чувствительность измерителя тока до 100 аА, разрешение источника до 1,5 фА

Модель 4225-PMU
с Моделью 4225-RPM

Разрешение источника напряжения 5 мкВ, чувствительность измерителя напряжения 1 мкВ

Удаленный
предусилитель

Блок
импульсных
измерений



Источник
питания/
измери-тель

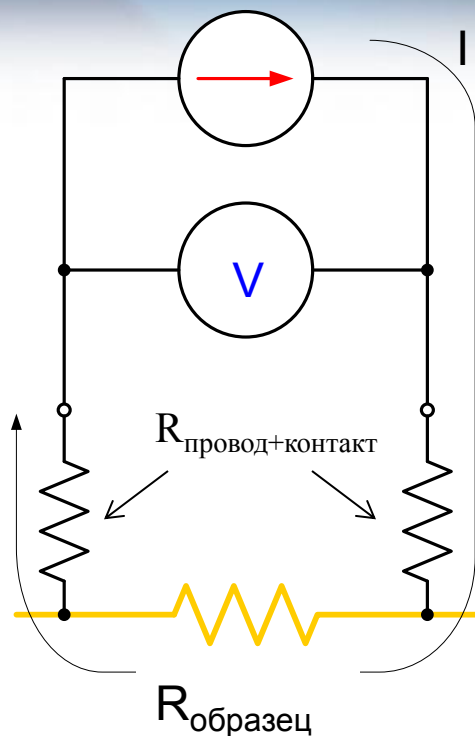
Модель 4200-SCS
Система для измерения
параметров п/п приборов



Зачем подавать ток и измерять напряжение по разным проводам?

Исключение ошибок, вызванных сопротивлением проводов и контактов

2-проводная схема

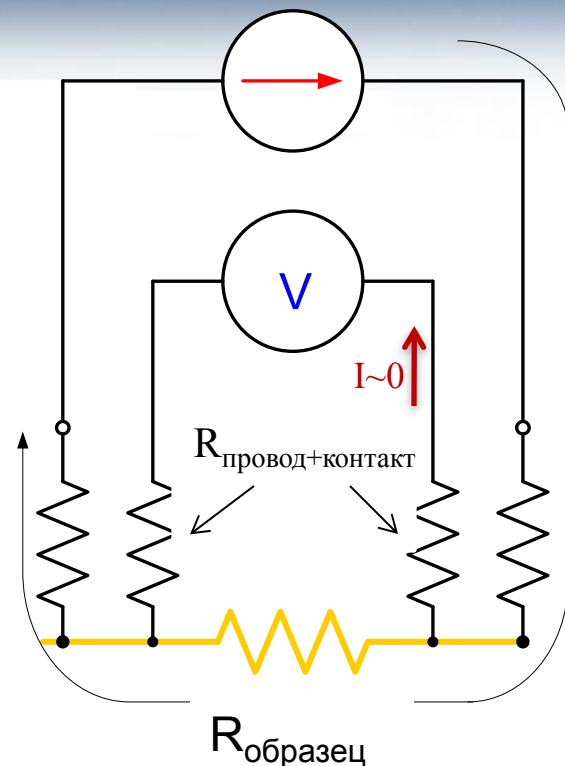


Расчетное сопротивление:

$$V_M / I = R_{\text{образец}} + 2R_{\text{провод+контакт}}$$

ОШИБКА

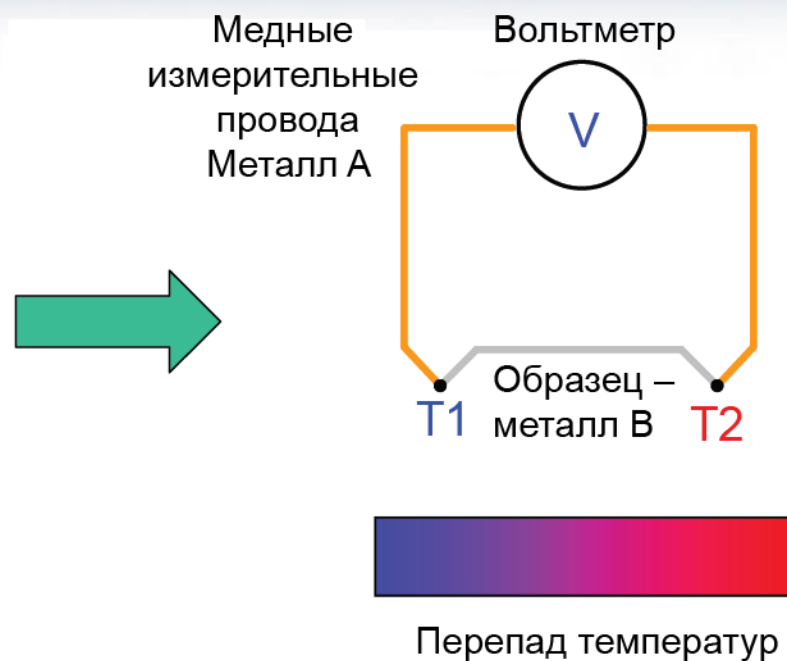
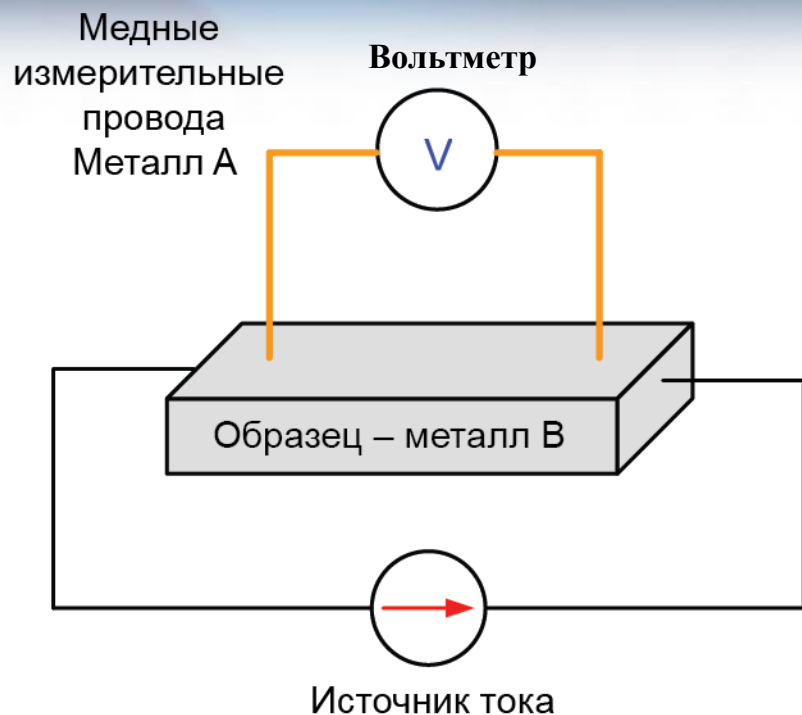
4-проводная схема



Расчетное сопротивление:

$$V_M / I = R_{\text{образец}}$$

Другой важный источник погрешности ТермоЭДС



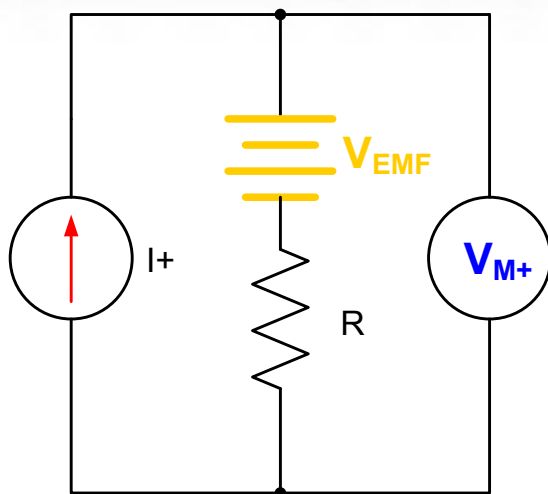
ТермоЭДС генерируются в том случае, когда разнородные металлы в схеме (Металл А и Металл В) имеют разную температуру (T_1 и T_2).

Способы уменьшения термоЭДС

- При построении измерительной схемы используйте соединительные проводники из одинаковых материалов.
- Минимизируйте перепады температуры в пределах схемы.
- Дайте прогреться измерительному оборудованию.
- Используйте методы компенсации смещения.

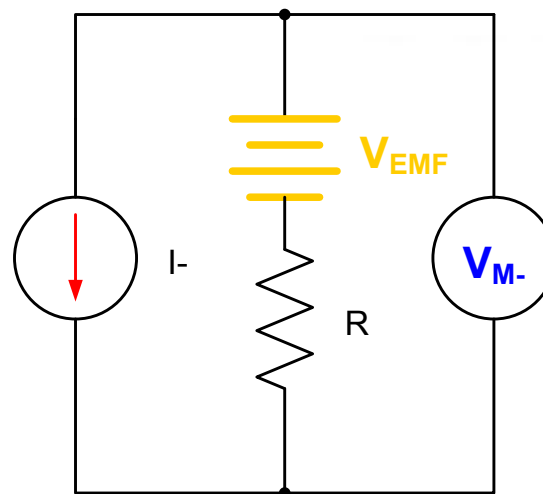
Применение метода обратного тока для компенсации напряжения смещения (V_{EMF})

Измерение с положительной полярностью



$$V_{M+} = V_{EMF} + IR$$

Измерение с отрицательной полярностью



$$V_{M-} = V_{EMF} - IR$$

Расчет напряжения:

$$V_{Dif} = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} = \frac{V_{EMF} + IR - (V_{EMF} - IR)}{2} = IR$$

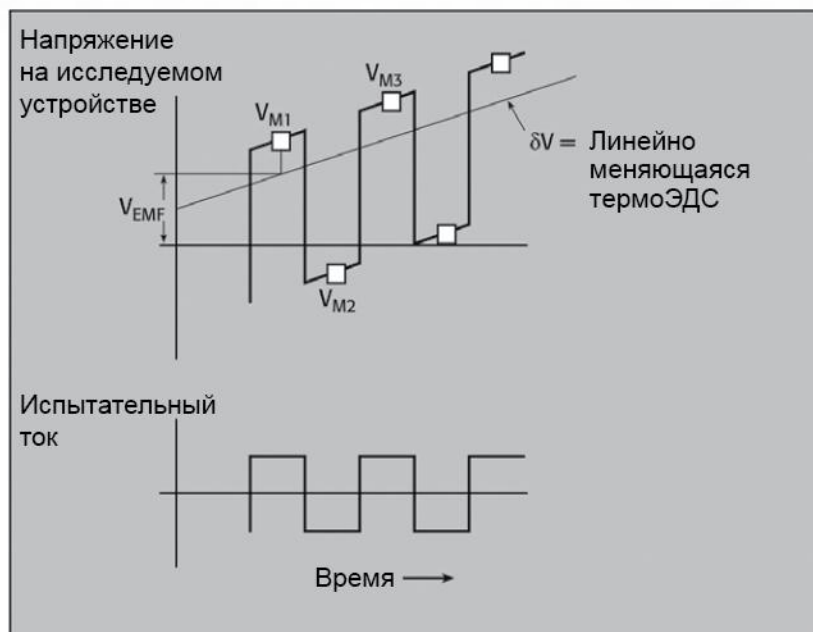
V_{EMF} скомпенсировано

Дальнейшие усовершенствования исключают и напряжение смещения и шум

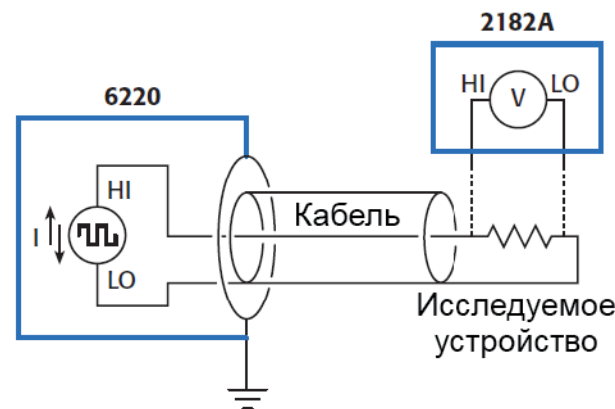
Режим дельта-измерений, реализованный в комбинации источника тока модели 6220 и нановольтметра 2182A

Дельта-метод

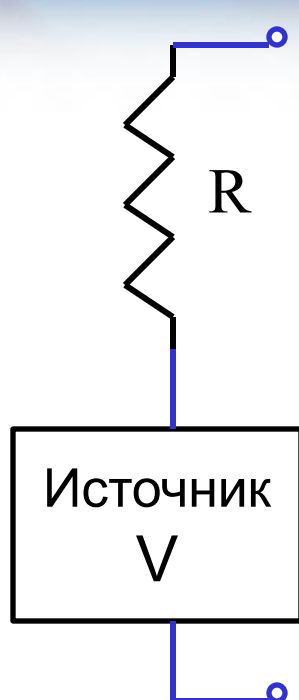
1. Источник тока переменной полярности
2. Получение скользящего среднего напряжения для расчета сопротивления



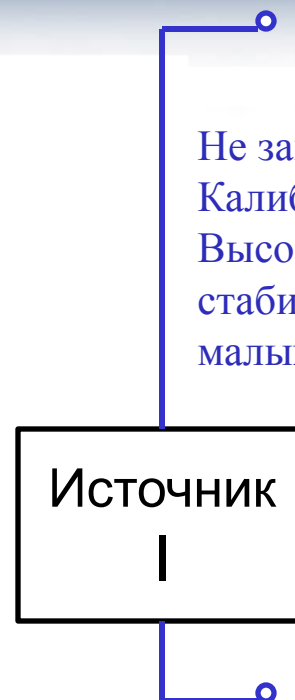
Усреднение сужает полосу шума и снижает низкочастотный шум



Лучше использовать источник тока, чем источник напряжения с последовательным сопротивлением

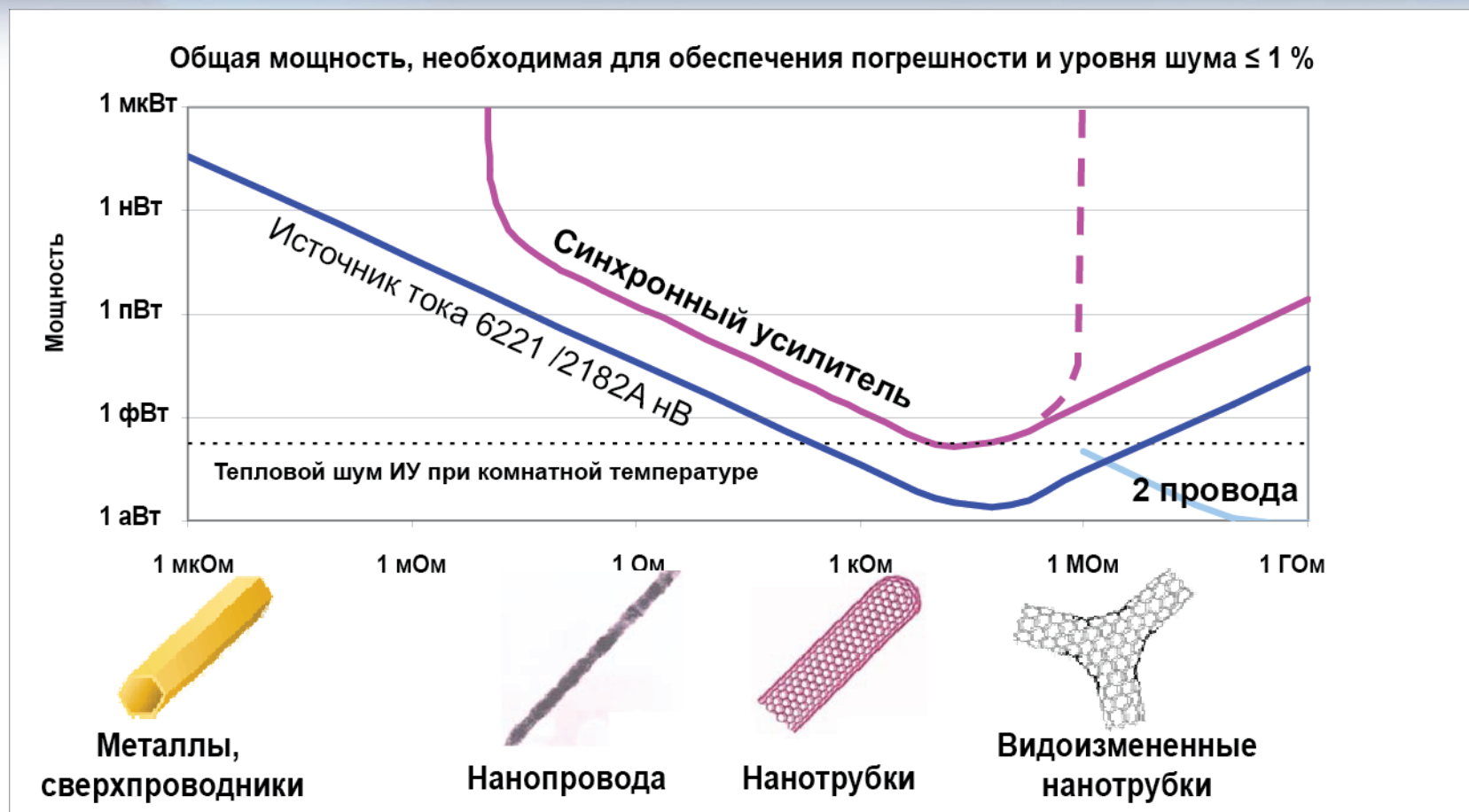


Ток действительно постоянен?
Сопротивление не изменяется?
Достаточно ли велико сопротивление для создания идеального источника тока?



Не зависит от нагрузки
Калиброванный
Высокое разрешение и стабильность в области малых токов

Модель 622X/2182A отвечает требованиям по малой рассеиваемой мощности и низкому уровню шума



Обеспечение надежного низкоомного контакта с графеном



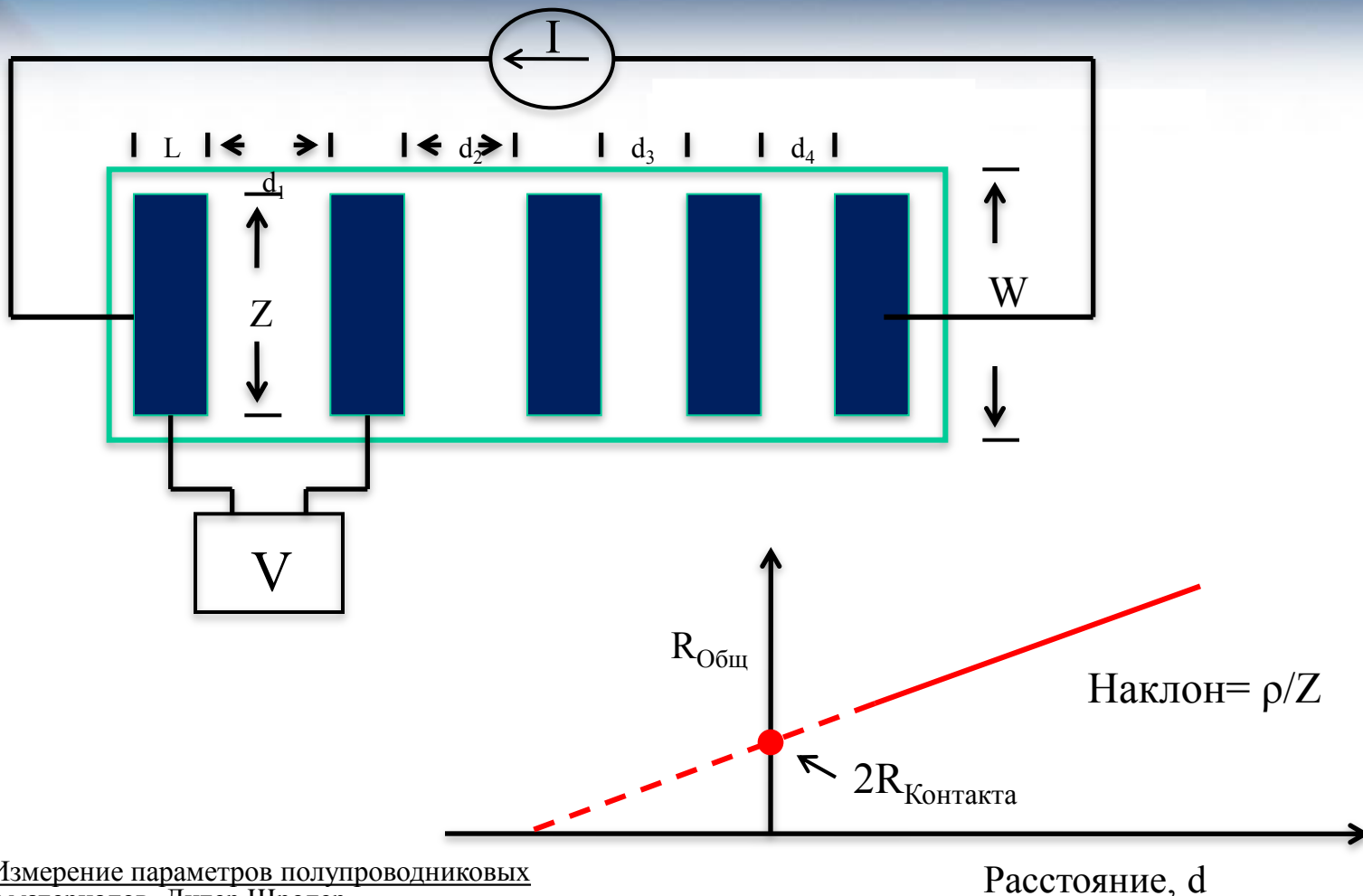
Достижимы сопротивления $<10^{-7}$ Ом-см

Плазменная обработка в атмосфере O_2 перед металлизацией

Отжиг в атмосфере N_2/H_2 при температуре $450^\circ C - 475^\circ C$ в течение 15 минут

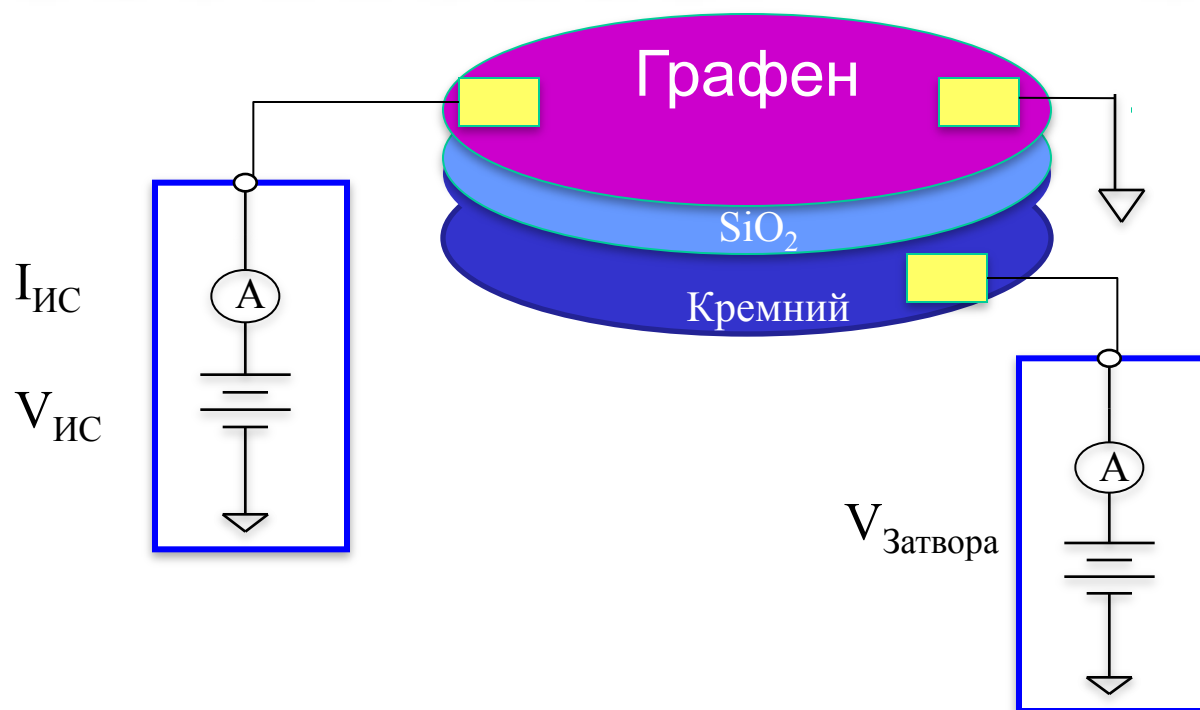
Источник: Установка контакта с графеном, Дж. Робинсон с соавторами,
Государственный университет Пенсильвании, 2010

Определение сопротивления контактов путем измерения длины передачи



Более удобное измерение структуры на основе графена

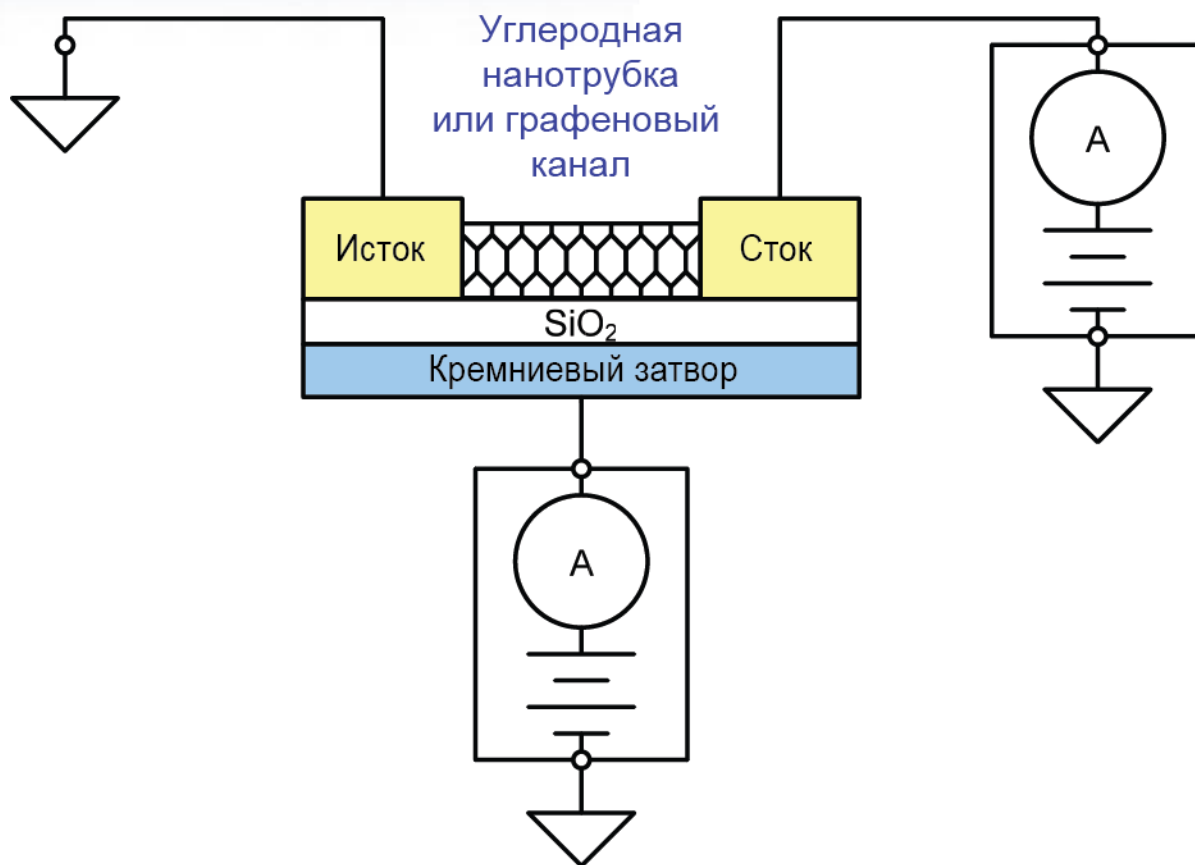
Зависимость $I_{\text{ИС}}$ от $V_{\text{Затвора}}$



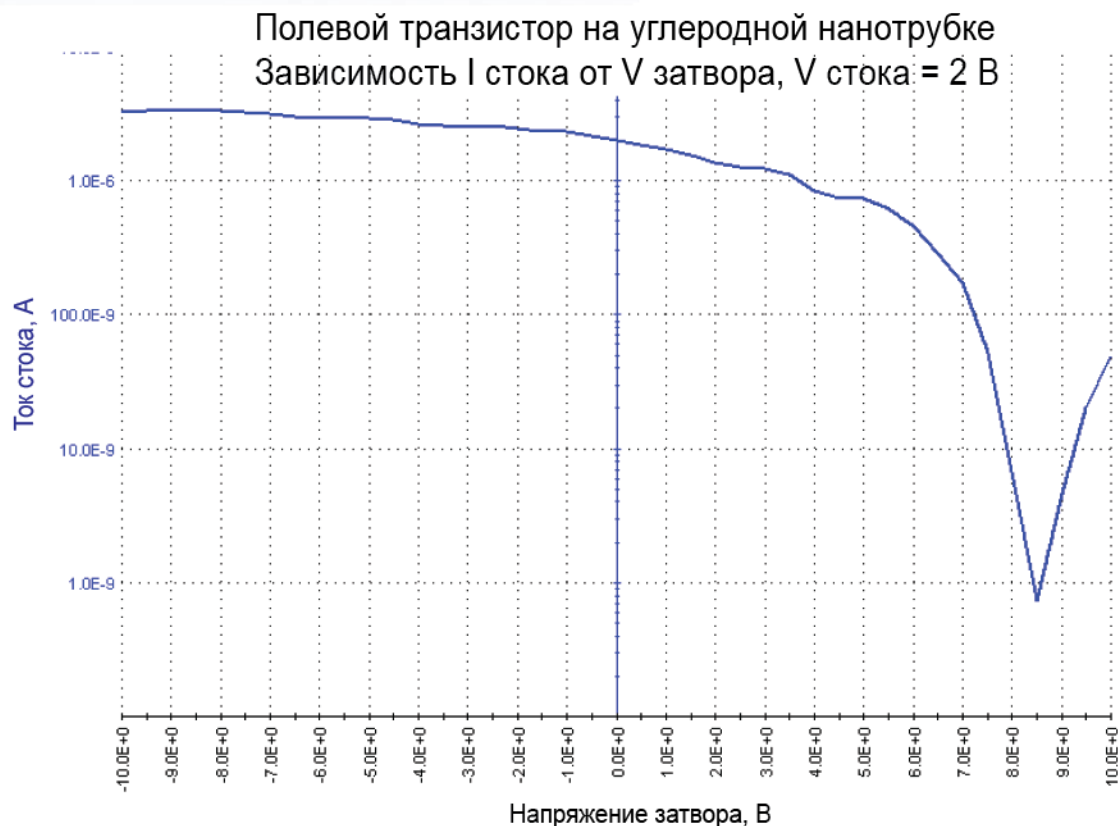
Измерение зависимости $I_{ис}$ от $V_{затвора}$ $V_{ис} = \text{Константа}$



Схема измерения семейства ВАХ стока в полевом транзисторе на углеродной нанотрубке или в полевом транзисторе с графеновым каналом



Пример измерения зависимости $I_{\text{ис}}$ от $V_{\text{затвора}}$ для углеродной нанотрубки (CNT)



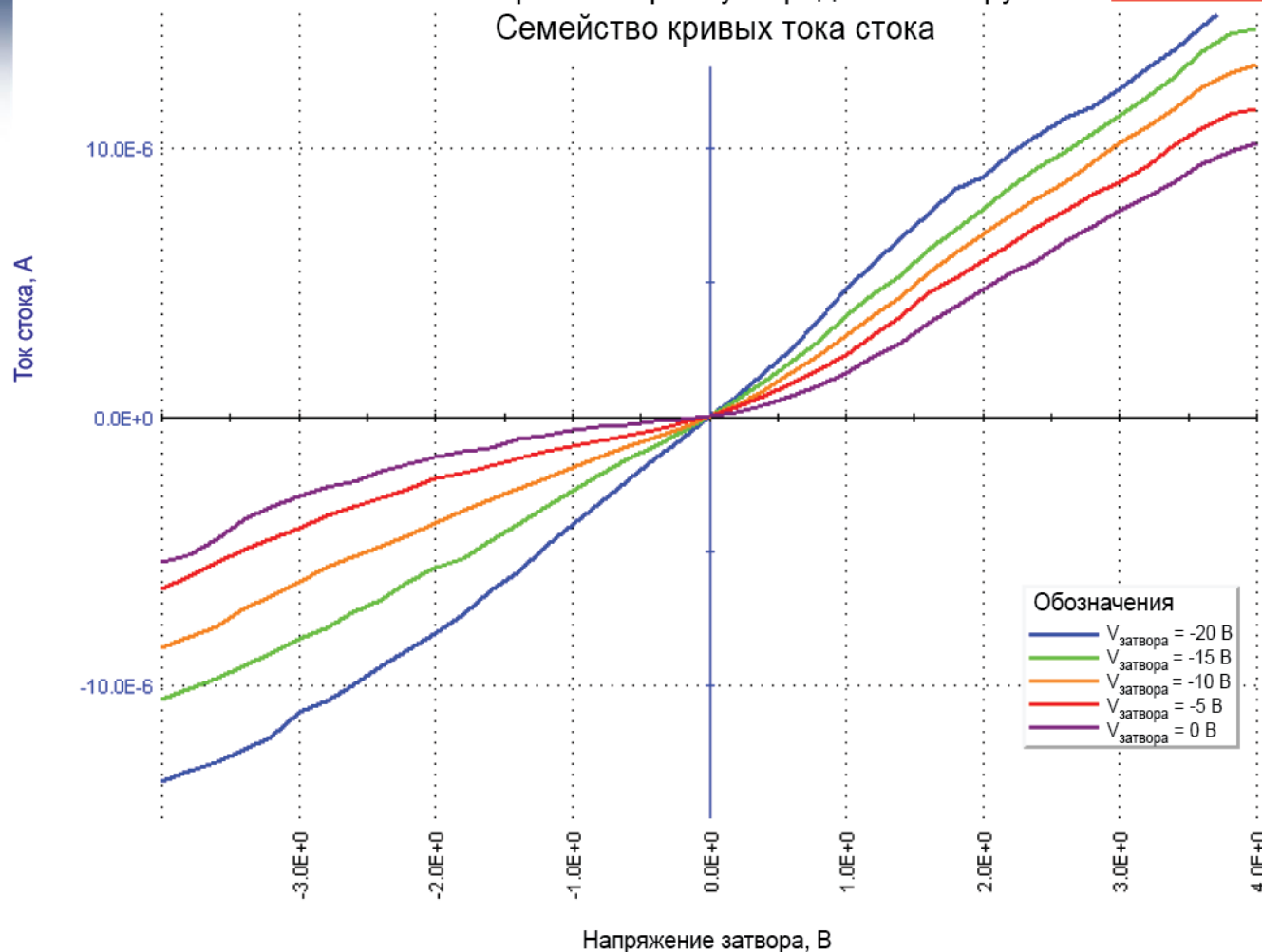
Пример измерения полевого транзистора на углеродной нанотрубке

08/31/2010 15:06:58

Полевой транзистор на углеродной нанотрубке

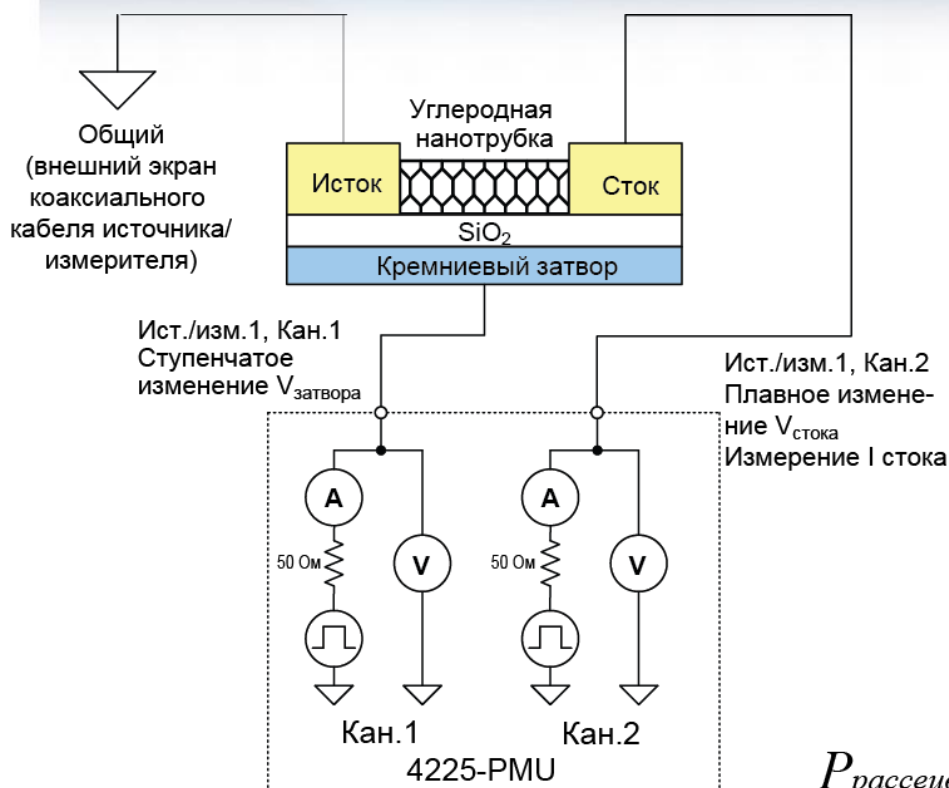
Семейство кривых тока стока

KEITHLEY

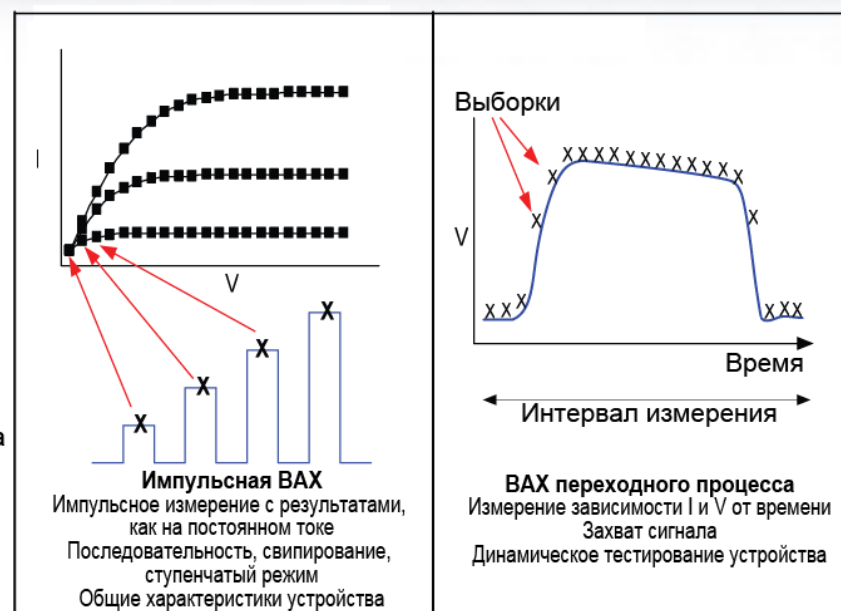


Измерение импульсной ВАХ полевого транзистора на углеродной нанотрубке

Пониженная рассеиваемая мощность и дрейф тока Исследование быстрого отклика



Двухканальный блок
импульсных измерений



$$P_{\text{рассеиваемая}} = V_{\text{пост.}} * I_{\text{пост.}} * \frac{\text{Длит. импульса}}{\text{Период импульсов}}$$

Импульсные ВАХ полевого транзистора на углеродной нанотрубке

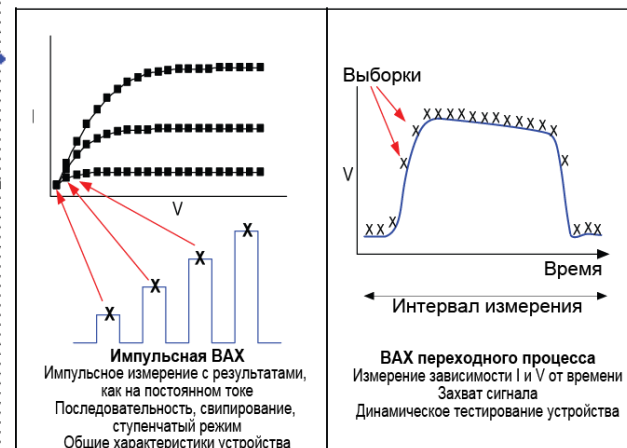
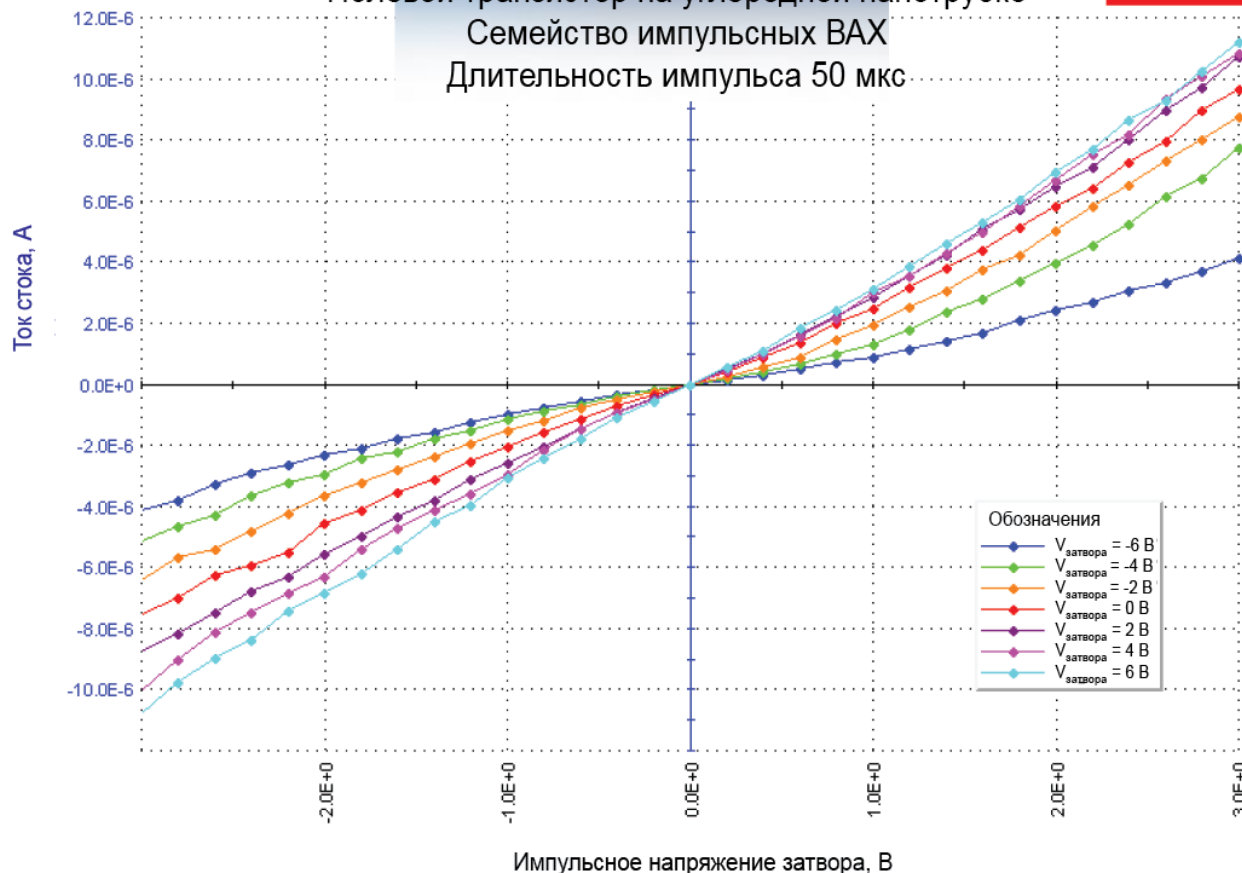
09/01/2010 15:09:42

Полевой транзистор на углеродной нанотрубке

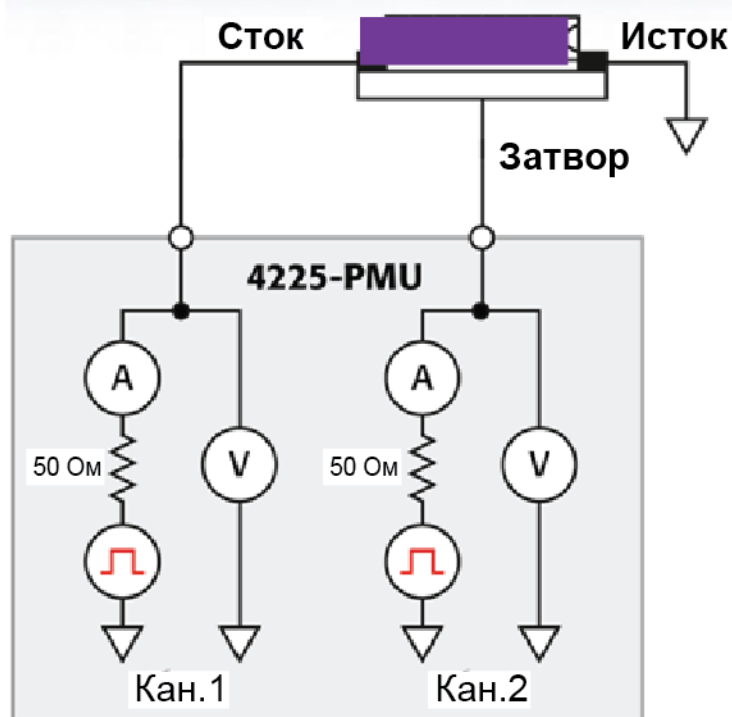
KEITHLEY

Семейство импульсных ВАХ

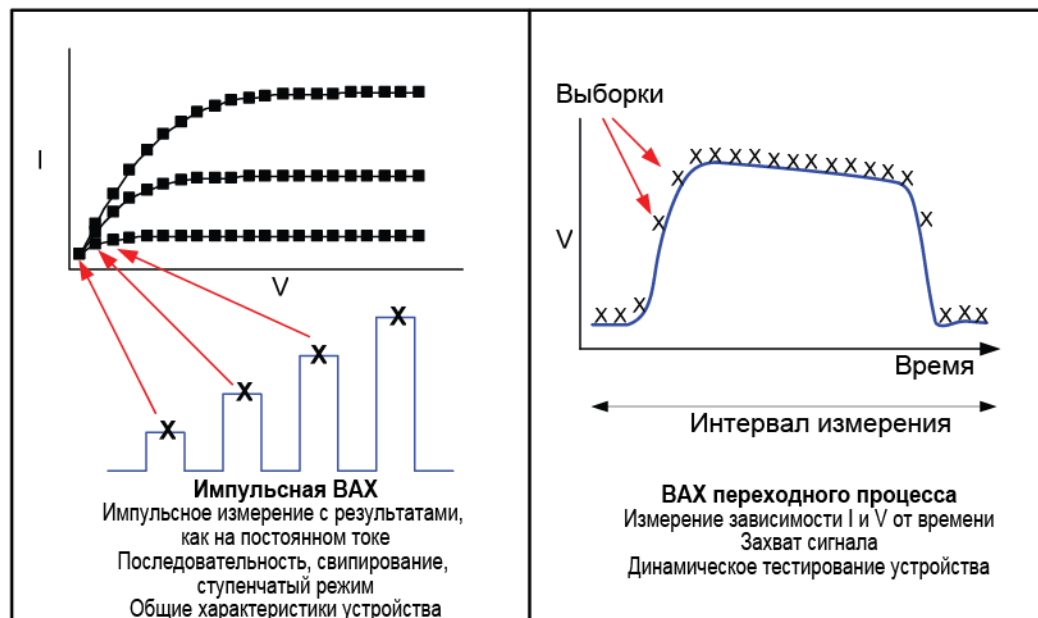
Длительность импульса 50 мкс



Подача импульсного сигнала на графеновые устройства снижает ток дрейфа за счет захваченных зарядов и позволяет исследовать переходные процессы



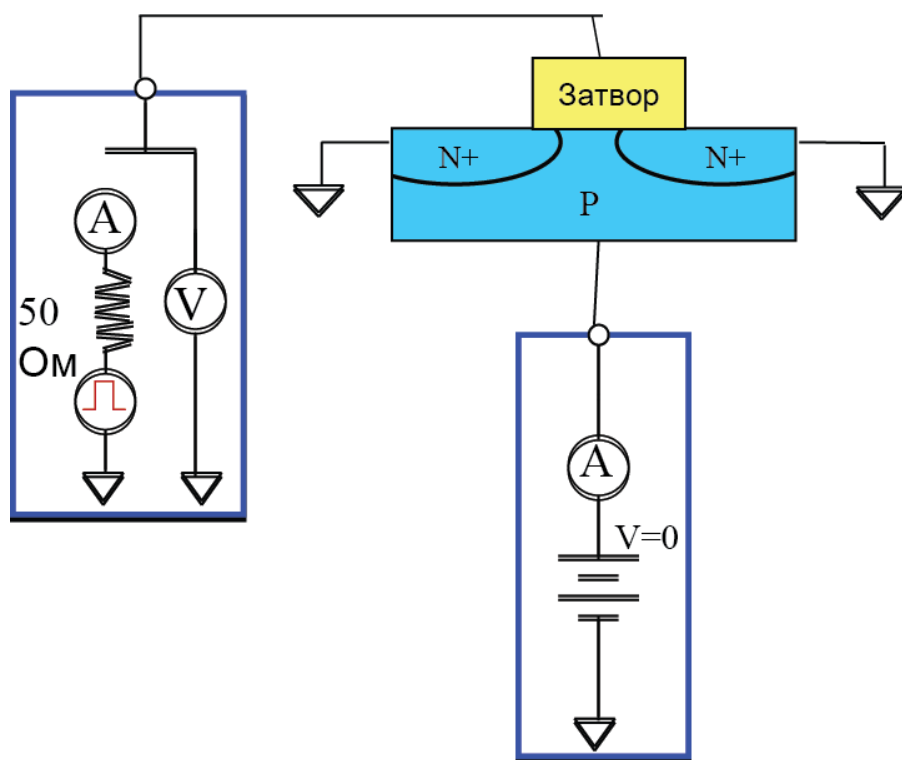
Двухканальный блок импульсных измерений



Измерение параметров канала – граница раздела диэлектрических сред

Измерение накачки заряда

Схема измерения концентрации ловушек на границе раздела

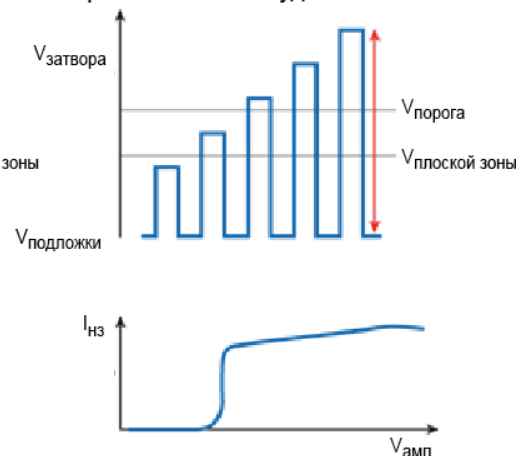


Два распространенных метода накачки заряда

Фиксированная амплитуда /
сweeping напряжения подложки

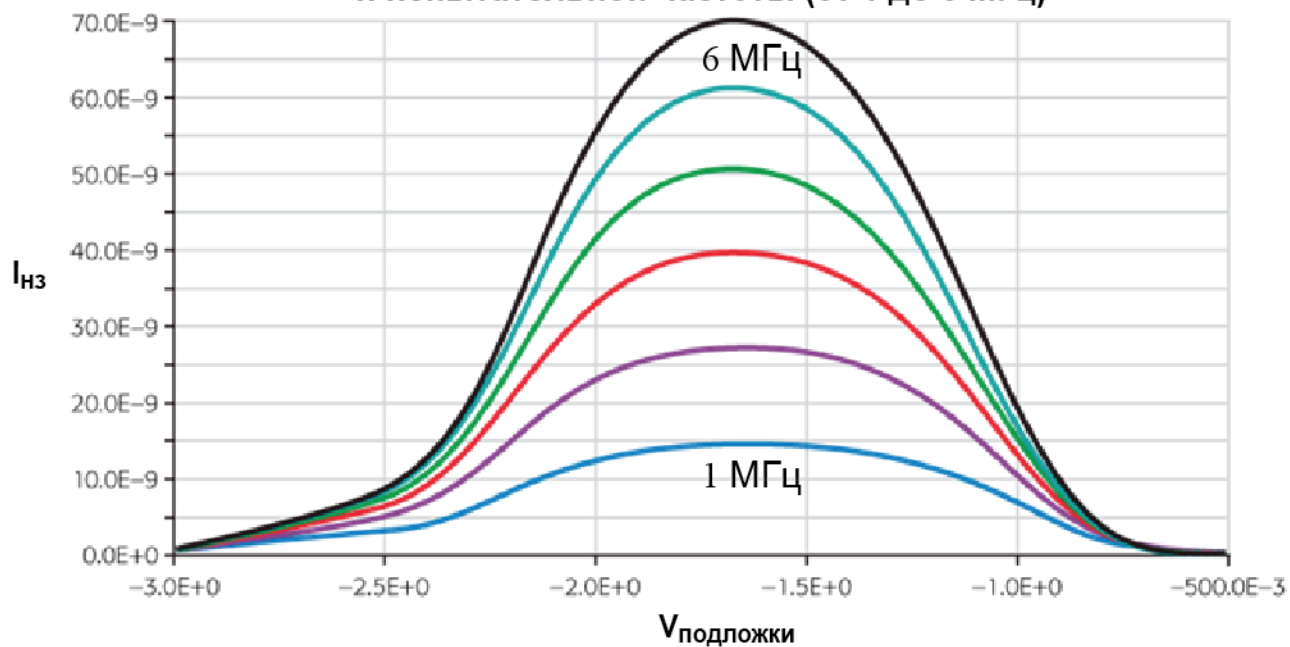


Фиксированное напряжение подложки /
переменная амплитуда



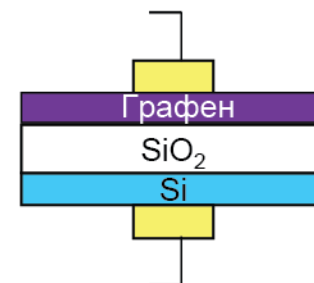
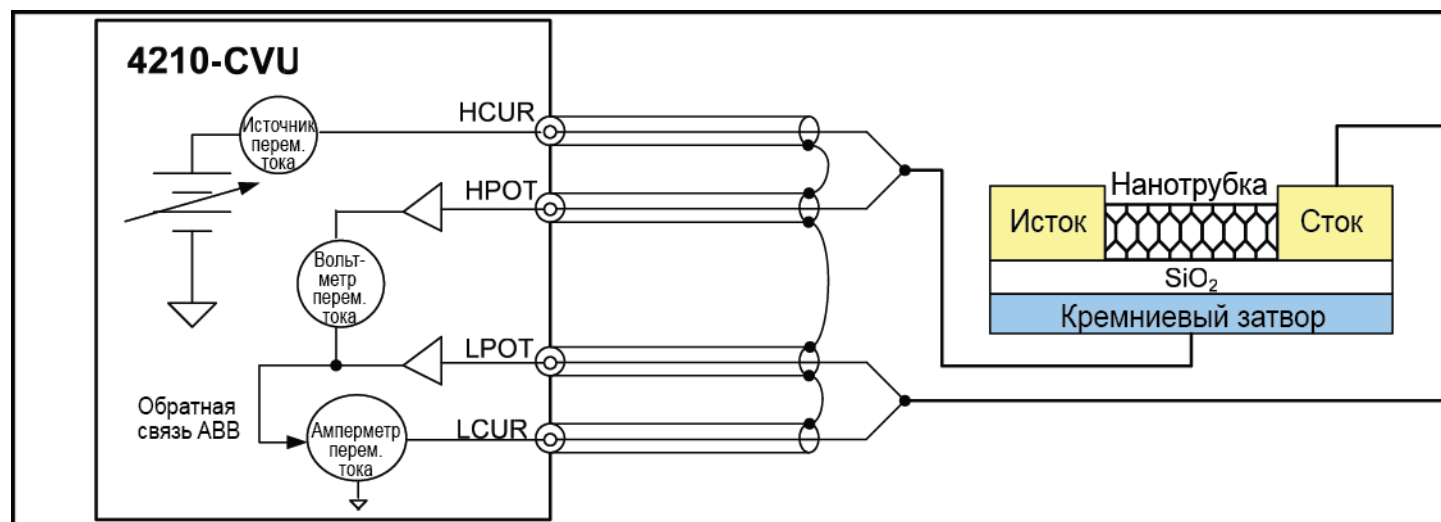
Результаты измерения накачки заряда

Зависимость тока накачки заряда ($I_{\text{нз}}$) от напряжения подложки (V) и испытательной частоты (от 1 до 6 МГц)



Измерение напряжения на конденсаторе

Сегодня можно изготавливать графеновые образцы достаточного размера для изучения оксидов в устройствах на основе графена



Источники ошибок при измерении характеристик материалов и устройств с малой рассеиваемой мощностью

- Неверный выбор приборов
- Сопротивление соединительных проводов
- Сопротивление контактов
- ТермоЭДС
- Источники шума
 - Низкочастотный шум
 - Внешние источники шума
 - Магнитные поля
- Деградация образца



Внешние источники шума

Люминесцентные лампы



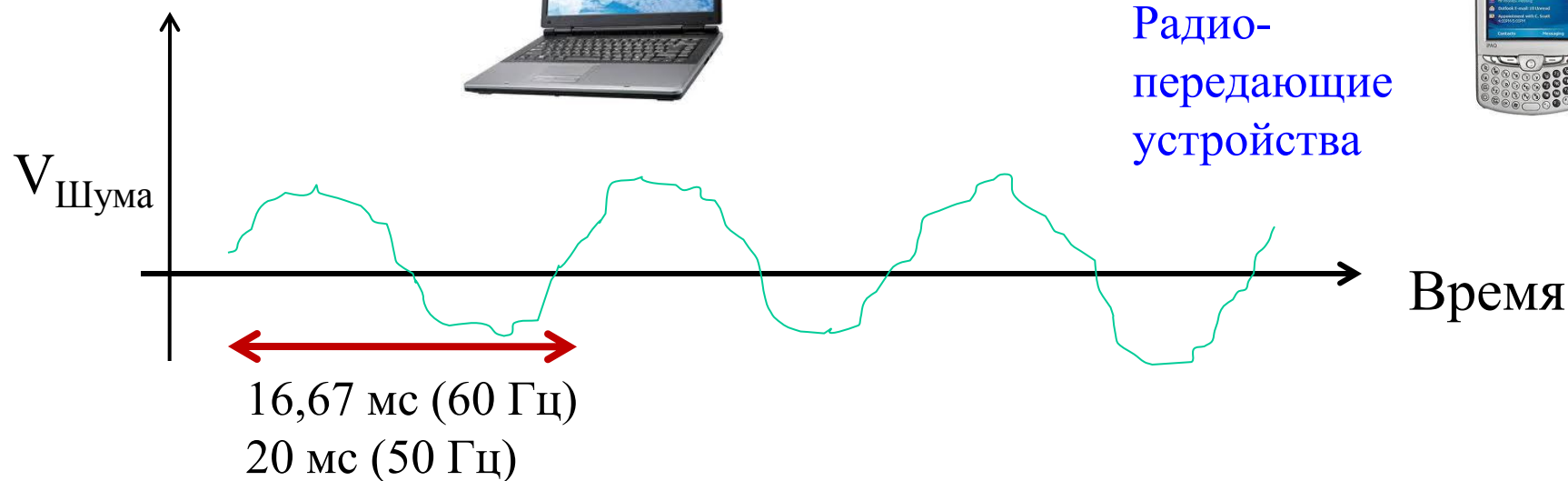
Прочее электронное оборудование



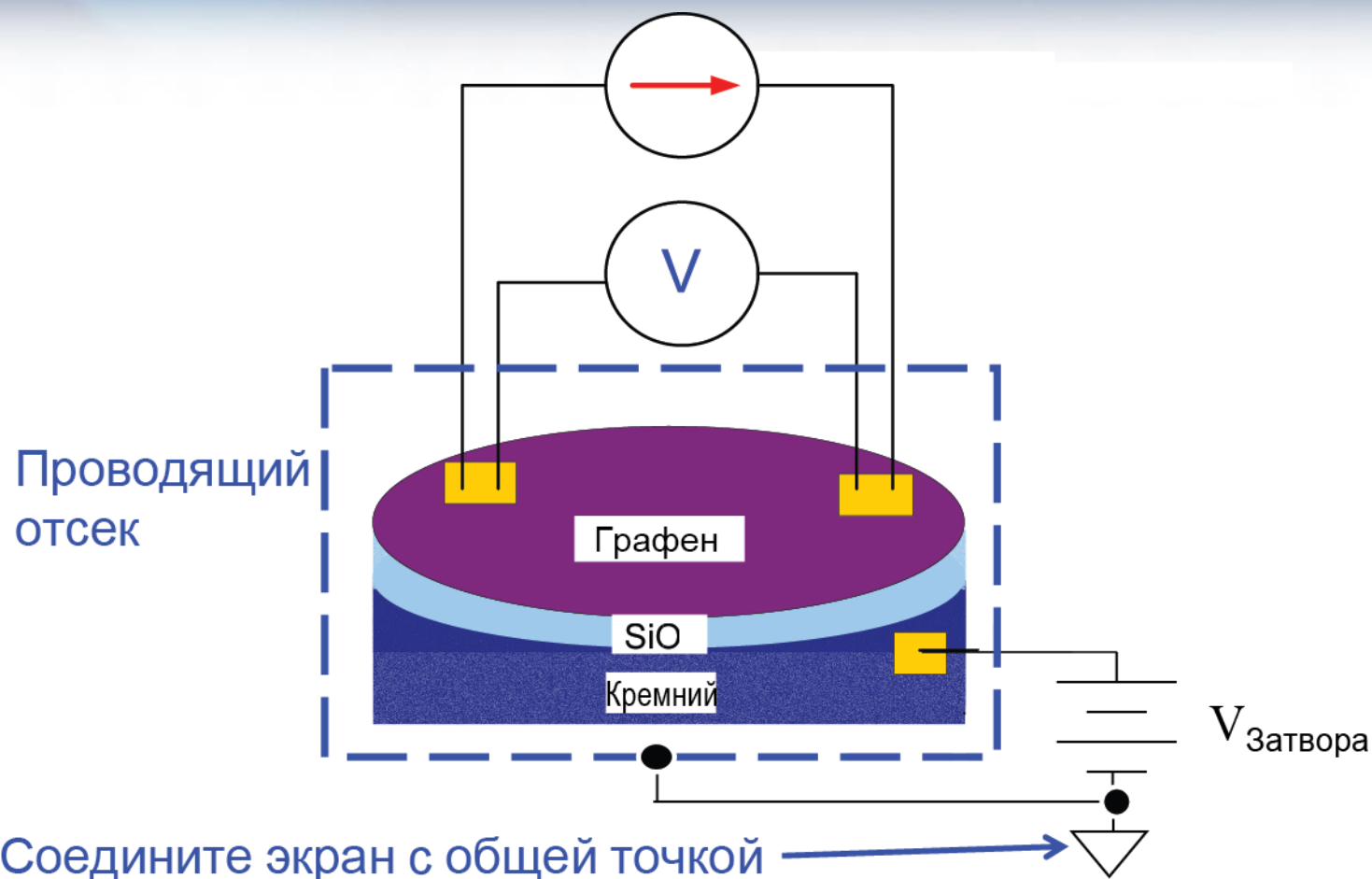
Электро-
двигатели
насосов и др.
приводы



Радио-
передающие
устройства



Размещение образца в электростатическом экране для минимизации помех от внешних источников

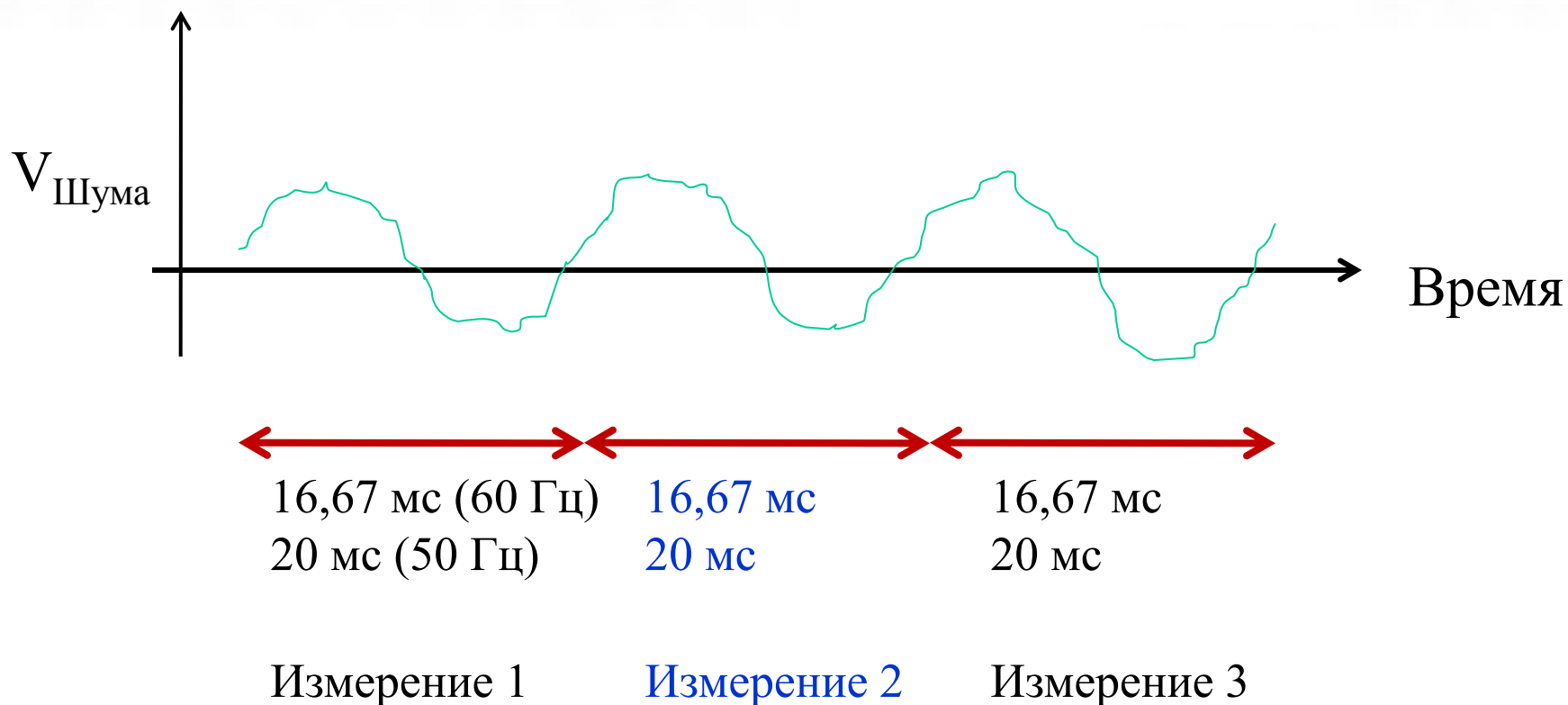


Повышение качества измерений за счет экранирования

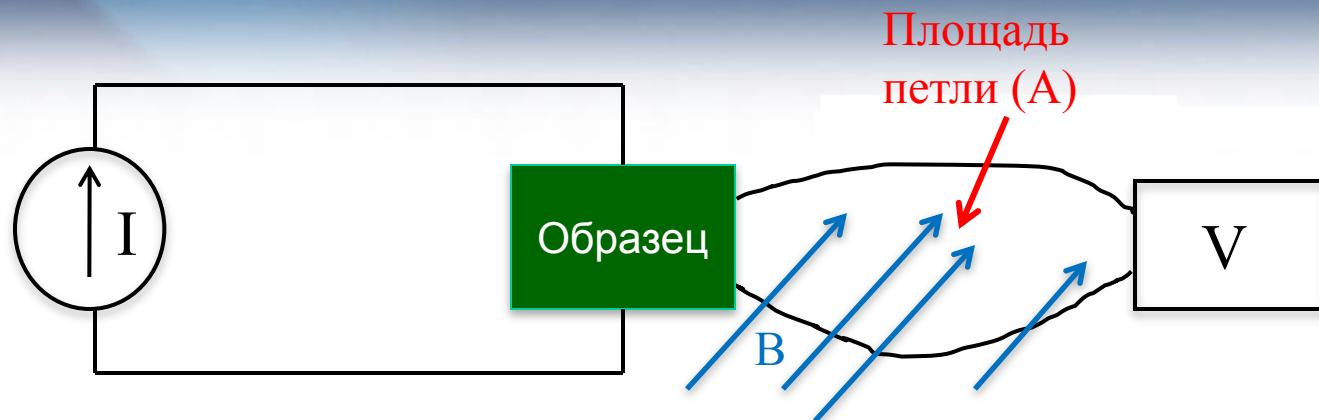


Повышение качества измерений

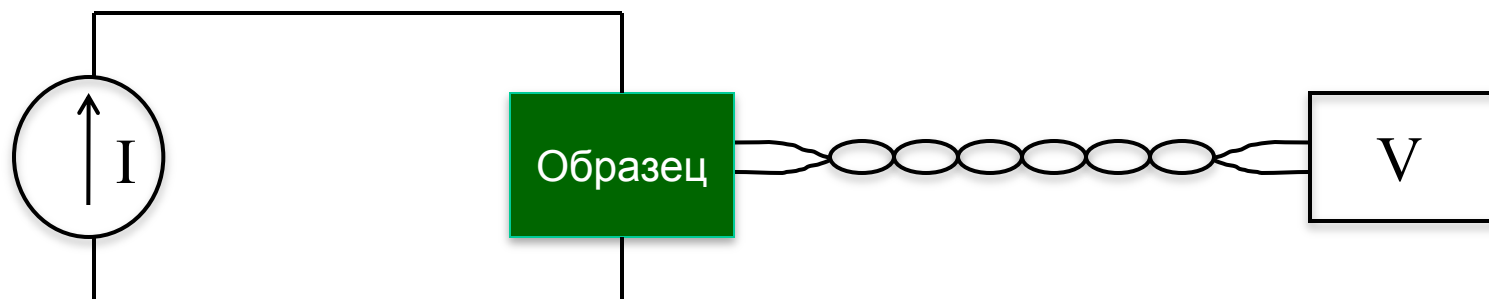
Выполняйте измерение за период напряжения электросети



Исключайте напряжения, наведенные магнитными полями

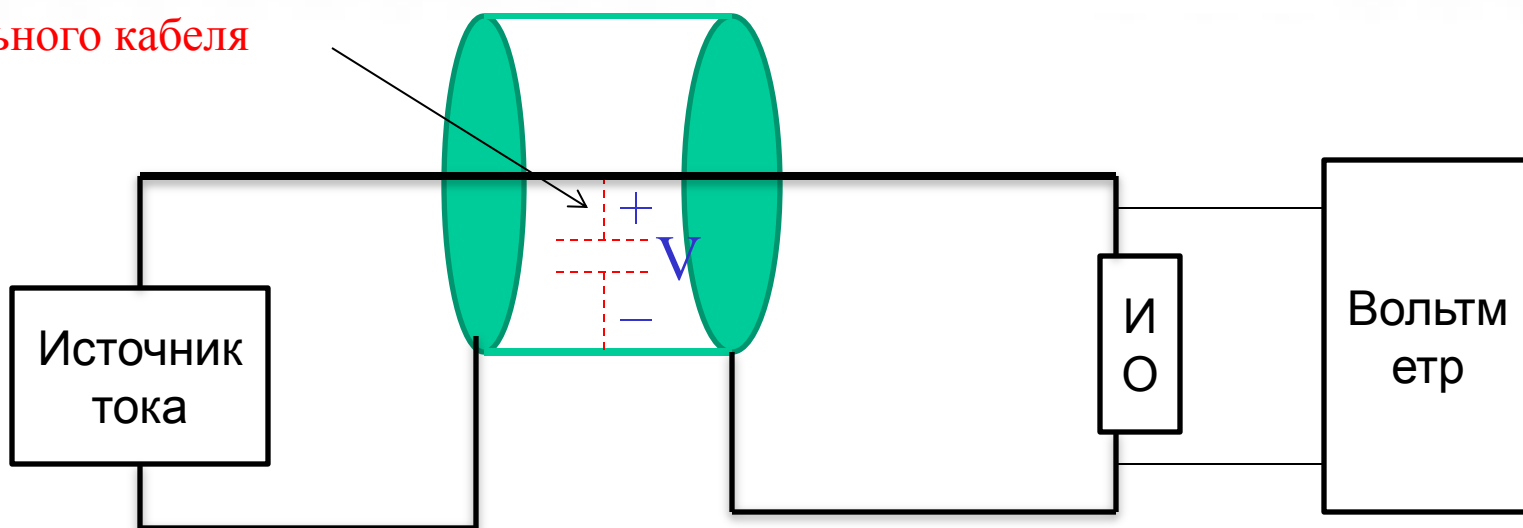


$$V_B = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(BA)}{dt} = B \frac{dA}{dt} + A \frac{dB}{dt}$$



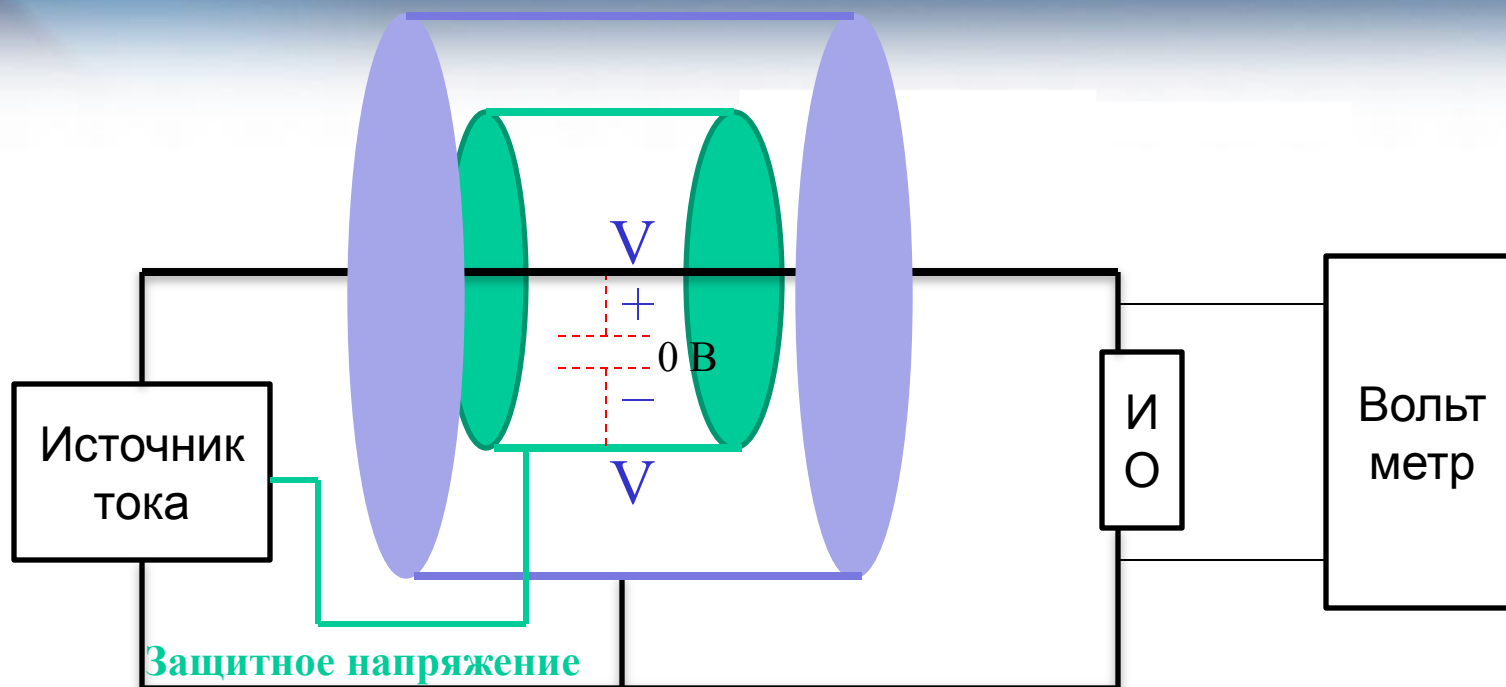
Напряжение на емкости кабеля может повредить маломощные образцы и тонкие проводники

Распределенная емкость
коаксиального кабеля



При отключении источника тока емкость может разрядиться через испытуемый образец (ИО)

Триаксиальные кабели и защита могут снизить вероятность повреждения проводов и образца



Используйте 3-проводной триаксиальный кабель

Подайте выходное напряжение на внутренний проводник

В этом случае ΔV между центральным и внутренним проводником = 0 В

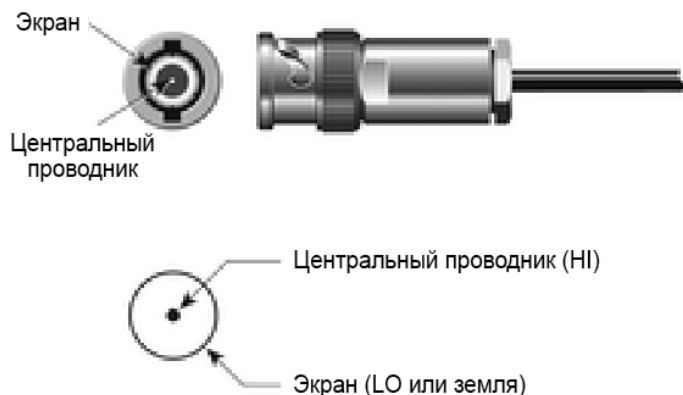
Снижается вероятность разряда емкости кабеля через образец

Сравнение коаксиального кабеля с разъемом и триаксиального кабеля с разъемом

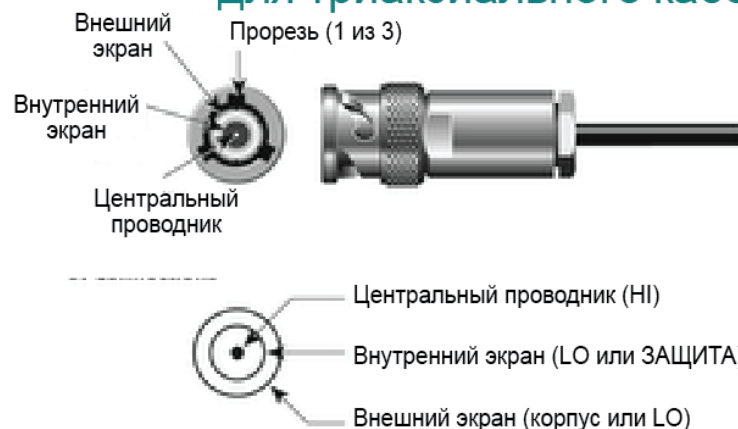
Коаксиальный кабель

Триаксиальный кабель

Разъем BNC для коаксиального кабеля

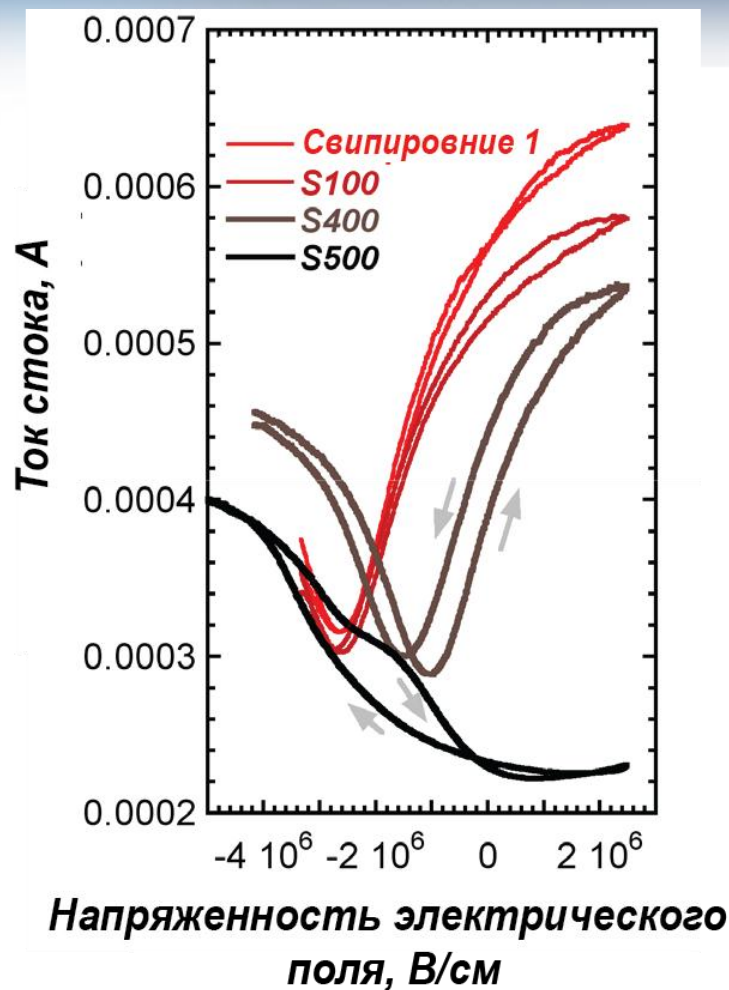


Триаксиальный разъем для триаксиального кабеля



Проверяйте качество результатов своих измерений

Не деградировал ли диэлектрик?



Не снизился ли пиковый ток?

Не вырос ли гистерезис?

Заключение

Необходимо обеспечить следующие условия:

Приборы с достаточной чувствительностью и функциональностью

Надежные контакты измерительных цепей

Правильные методы измерения

- Компенсация смещения

- Интегрирование за период сетевого напряжения

- Фильтрация

- Экранирование

Исключение внешних источников шума

Минимизация рассеиваемой мощности

Дополнительные справочные материалы

- Справочник по измерениям для нанотехнологий
 - Справочник по низкоуровневым измерениям
 - «Измерение полупроводниковых приборов и материалов» Дитера Шродера
 - Технические описания и рекомендации по применению для наших источников тока, нановольтметров, источников питания/измерителей и систем измерения характеристик полупроводниковых приборов можно найти на нашем сайте по адресу www.keithley.com.
- 

<http://www.keithley.com/knowledgecenter>

Обращайтесь с вопросами в компанию Keithley

Головной офис

В США: (+1) 888-KEITHLEY

За пределами США: (+1) 440-248-0400

Email: applications@keithley.com

Дополнительные офисы:

www.keithley.com

Россия и СНГ:

Официальный дистрибьютор
ЗАО "НПП Эликс"

г. Москва, Каширское шоссе д.57 к.5

Email: eliks@eliks.ru

www.eliks.ru